

2018 年度（第 54 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 18-A-6

UAV 写真測量と河道への応用方法

山口大学・准教授

神野有生

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2018 年 9 月

UAV写真測量と河道への応用方法

UAV-based Photogrammetry and Its Application to Rivers

神野有生（山口大学）

Ariyo Kanno (Yamaguchi University)

第1章 はじめに

UAV写真測量は、UAVから撮影した画像を用いて地物の3次元形状などを測定することである。特に近年、廉価で自律的な飛行・撮影が可能な小型UAV（例：DJI Phantomシリーズ；図- 1）と、撮影した画像からほぼ自動的に無数の点の測量を行ってくれる解析ソフト（例：Agisoft PhotoScan；図- 2）の登場により、これらを用いた地物の測量、3Dモデリング、DEM・オルソモザイク画像作成などが、急速に普及した。このような簡便なUAV写真測量は、100万円未満の投資で開始可能であり、高度な操縦技術や写真測量の専門知識がなくとも実施可能である。実際、写真測量を専門とする航測会社のみならず、地方のコンサルタントや、各分野の研究者によって、広く用いられるようになってきている。

UAV写真測量の対象は、公共物に限っても、護岸・ダム・橋梁などの土木構造物、造成工事や斜面崩壊の現場など、幅広い。例えば河道においても、堤防の天端の亀裂や沈下から、河道の土砂堆積・川幅縮小まで、様々な変状の検出が可能である（野間口ら，2018）。現状では定期的な測量が行われていない、二級河川における測量手段としても期待されている。

しかし、自動的な解析は便利な反面、ブラックボックスでもある。PhotoScanなどのソフトで、各画像の正確な撮影位置や向きを与えるわけでもないのに何百・何千万点もの測量が出来てしまうのは、SfM (Structure from Motion)やMVS (Multi-View Stereo)という解析技術が実装されているためである。これら



図- 1. 小型UAVのDJI Phantom 4 Pro. 寸法が対角35 cm, 重量が約1.4 kgと小型軽量ながら、有効画素数2000万画素の広角カメラを搭載し、約20分の自律飛行・撮影が可能。

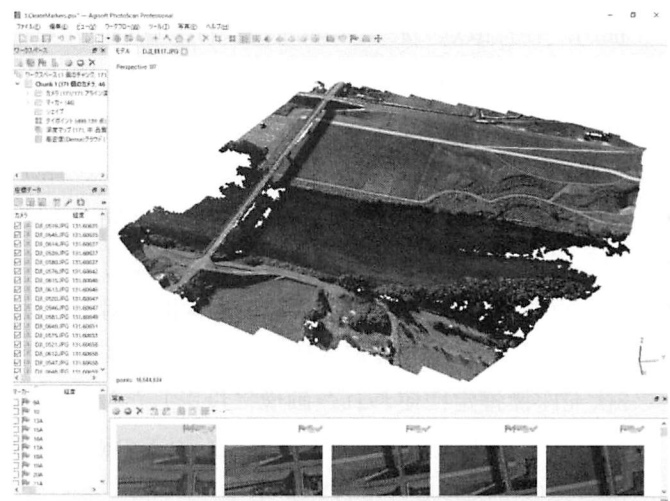


図- 2. 解析ソフトAgisoft PhotoScan. GUIによる細かな解析条件の指定と、ほぼ自動的な解析が可能。ここでは171枚の画像から1,664万点の座標を推定している。

に関する最低限の理解がないと、解析の設定・手順、もしくはそもそもの撮影方法を誤って、本来の精度を得られないことも多い。反対に、ほんの少しの理解があれば、撮影や解析で何に注意すればよいのか、見当がつくことも多い。

そこで本稿では、冒頭に述べた「簡便なUAV写真測量」について最小限の用語・概念を整理した後、SfM、MVSを用いた自動的な解析の仕組みを概観する。その後、UAV写真測量の対象の1つである河道を例に、現地作業および解析における注意点を論じる。解析ソフトとしては著者が用いているPhotoScanを念頭に置いているが、本稿の内容の大部分はソフトを問わない一般的なものである。

第2章 用語・概念の整理

本章では、以降の説明に必要な最小限の用語・概念を整理する。

- 世界座標系：地図投影に用いられる座標系（例：平面直角座標系）や、対象領域の周辺に便宜的に定義された座標系で、撮影や解析によって動かないという意味で絶対的な、3次元直交座標系。単位は通常 m。
- カメラ座標系：カメラの投影中心を原点とする3次元直交座標系。画像の右向きにX軸，下向きにY軸，奥行き方向の正面向きにZ軸をとる（図-3）。単位は通常 m。
- 画素座標系：撮像面上（画像上）で特定の点が写った位置を示すための、画素（pixel）単位の2次元座標系。通常、画像の中心ないしは左上隅を原点とする（図-4）。
- 投影：カメラによる撮影により、3次元の実世界を、2次元の画像に変換すること。幾何学的には、世界座標からカメラ座標を経て画素座標に至る、座標変換である。
- カメラモデル：実際のカメラによる投影を模擬するための数学モデル。この変換は理想的なピンホールカメラでは線形であるが、実際のカメラでは、歪みがあるため非線形である。このモデルはいくつかのパラメータ（画面距離、主点の画素座標、歪みに関する係数など）を持ち、内部パラメータと呼ばれる。内部パラメータは通常、1回の飛行中には一定として扱う。
- カメラパラメータ：カメラ固有の内部パラメータ（カメラモデルのパラメータ）および外部パラメータ（各画像の撮影位置と撮影の向き）を合わせた呼称。
- SfM：重なりのある多数の画像から、カメラパラメータを推定する解析技術。各画像における特徴点の抽出、各特徴点の特徴量の評価、特徴量が似た特徴点の画像間での対応付け（マッチング）、対応付けられた点の3次元座標とカメラパラメータの同時推定、の各ステップからなる。
- MVS：重なりのある多数の画像とカメラパラメータから、多点の3次元座標を推定（高密度な3次元点群を生成）する解析技術。座標が推定される点の密度はSfMより大きい。
- タイポイント：SfMにおいて、複数の画像間で対応付けられ、3次元座標が推定される特徴点。
- 疎な点群：SfMの副生成物として得られる、タイポイントの集合。
- 密な点群：MVSにおいて、複数の画像間で対応付けられ、座標が推定された点の集合。
- 再投影誤差：SfMで推定されたカメラパラメータに基づき、同じくSfMで生成されたタイポイントをその3次元座標推定に使われた画像に投影した位置（画素座標）と、元のタイポイントの位置との距離。単位は画素。疎な点群に関する再投影誤差のRMS（2乗平均平方根）は、カメラパラメータと疎な点群に関する幾何学的矛盾の度合いを示す。
- 標定点：画像上で特定でき、世界座標を精密に実測した点であり、画素座標・世界座標が既知の点として解析に用いる点。通常は現地に置いた対空標識の中心に定義する。用途は、推定した撮影位置や3次元点群に世界座標を与える（ジオリファレンス）、カメラパラメータの調整（バンドル調整）に動員する、の2種類ある。用途によって、必要数や望ましい配置が異なる。

- 検証点：画像上で特定でき、世界座標を精密に実測した点であり、UAV写真測量の精度検証に用いる点。
- 対空標識：画像上で特定できる点（標定点や検証点）を作るために、現地に設置する板状の標識。
- 地上解像度（本稿での用語）：地上高さでの1画素の大きさ。主にUAVの対地高度、カメラの画角、解像度で決まる。

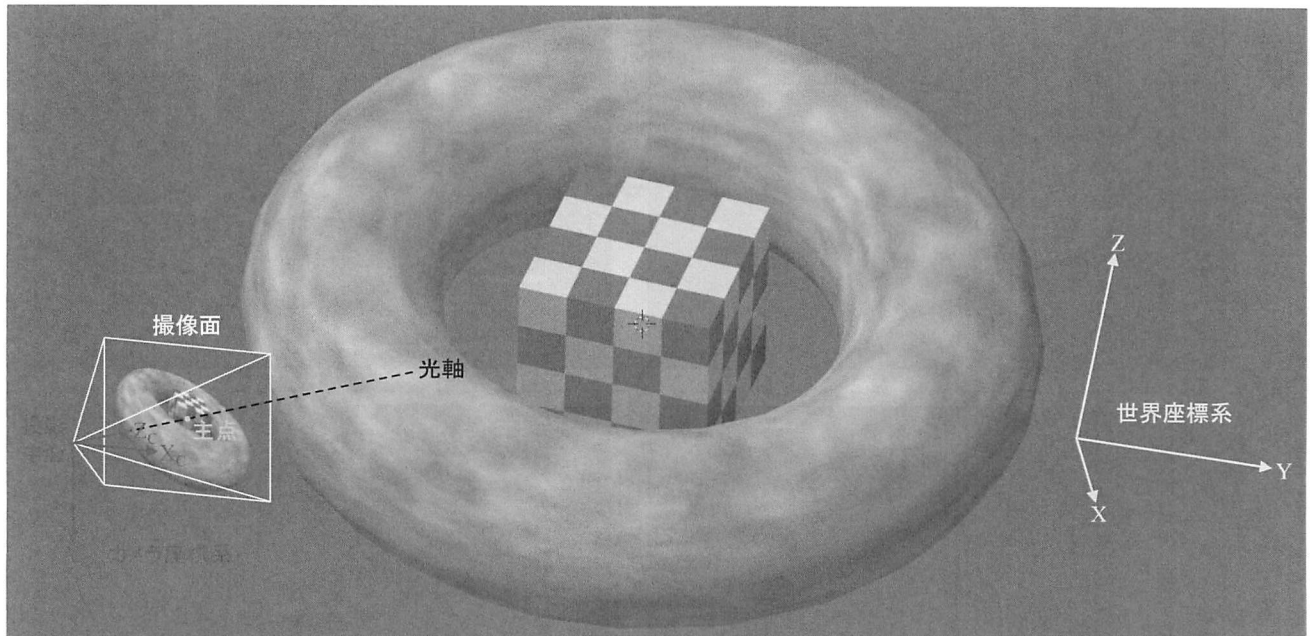


図-3. カメラ座標系のイメージ図。投影中心から光軸方向（カメラの正面、画像の奥行方向）にZ軸を設け、画像の右向きにX軸、下向きにY軸を設ける。カメラ座標系と世界座標系では原点の位置、軸の向きが異なる。

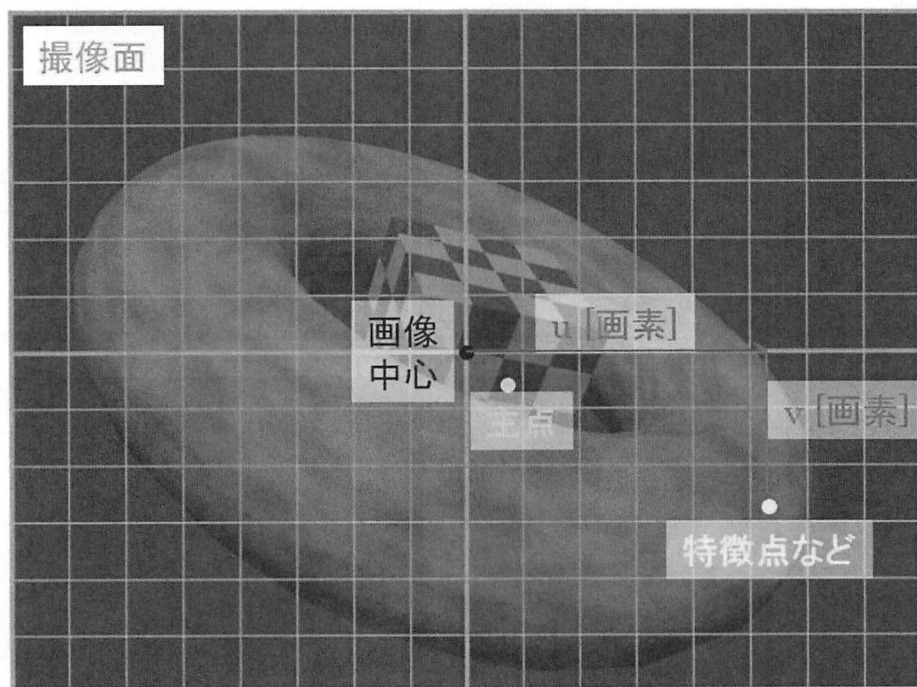


図-4. 画素座標系のイメージ図。特徴点など任意の点の画像上の位置を、画素単位の2次元座標で表す。主点は、図-3のように光軸と撮像面との交点であり、現実のカメラでは、画像中心と一致しない。主点の画素座標も、内部パラメータに含まれる。

第3章 自動的な解析の仕組み

3-1. SfMによるカメラパラメータの推定

本章では、簡便なUAV写真測量において、画像と少数の標定点のみから、無数の点の座標がほぼ自動的に推定される仕組みを述べる。全体のフローを図-5に示す。

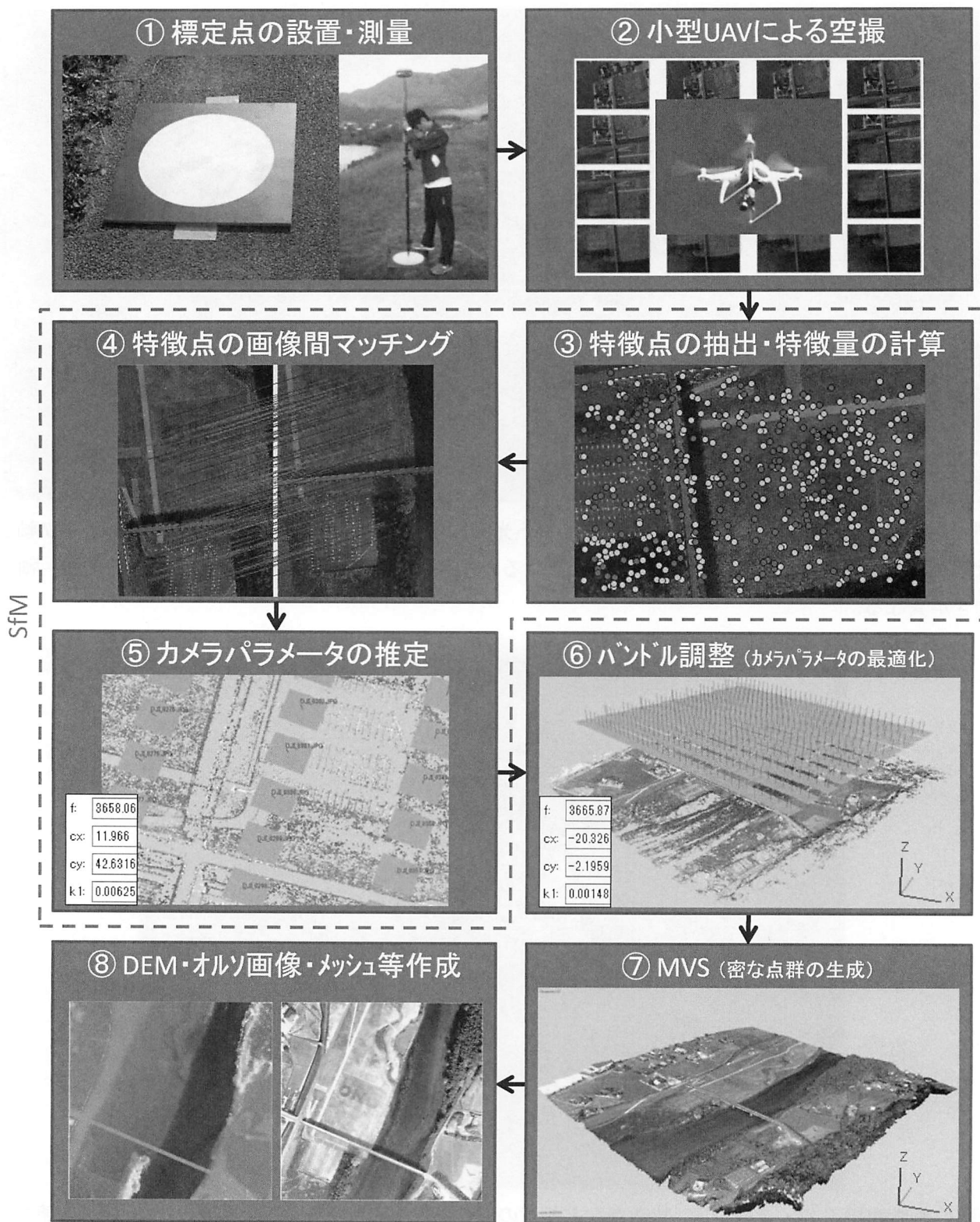


図-5. 標定点をバンドル調整に用いる場合の、簡便なUAV写真測量のワークフロー。各ステップの図はイメージ図であり、特徴点やマッチングの数は、実際は遥かに多い。

現地作業である標定点の設置・測量，小型UAVによる空撮（図-5の①②）の後，解析の最初のステップは，SfMと呼ばれる処理（図-5の③④⑤）によって，画像のみからカメラパラメータを推定することである．PhotoScanでは「写真のアラインメント」（とその直後に標定点を用いずに行う「カメラの最適化」）というコマンドに相当する．SfMでは，はじめに各画像から何百・何千の特徴点（同定しやすい特徴のある点）を抽出し，各特徴点について，それを特徴づける変数である特徴量を計算する（図-5の③）．特徴量としては，単純なRGB値ではなく，照明の変化や回転に対して変化が小さいように設計されたものが使われる．特徴点は特定の1画素に対応するわけではなく，その画素座標は1画素より小さな刻みで定義されるほか，大きさも様々である．次に，重なりのある複数の画像間で，特徴点のマッチング，つまり特徴量が似ている特徴点を対応付ける作業を行う（図-5の④，図-6）．この画像間の対応，つまり，「この画像でここに写った特徴点がこの画像ではここに写った」ということは，その特徴点の3次元座標とカメラパラメータに関する拘束条件となる．言い換えると，画像間の特徴点の対応が見つかるごとに，各画像の撮影の位置・向き，内部パラメータ，および対応付けられた特徴点（タイポイント）の3次元座標を関連付ける方程式が出来る．多数の対応付けが行われると，これらに関する連立方程式を解くことにより，カメラパラメータが求まるという仕組みである．実際には，方程式の数の方が未知数の数より多くなるので，連立方程式を出来るだけ満たすような解を，最適化（疎な点群に関する再投影誤差のRMSの最小化）により求める（図-5の⑤；図-7）．同時にタイポイントの3次元座標も求まり，タイポイントの集合は疎な点群を構成する．

実際には，誤った対応付けの影響を抑えるための工夫など，カメラパラメータの推定精度を上げるための処理が各所に入っていて，商用ソフトの場合はその内容は企業秘密であろうが，大まかにはPhotoScanなどに実装されているSfMは上記のような処理である．これだけでも知っていると，次のような注意点が自ずと理解できる．

1. 傷・汚れ・色ムラのないコンクリート面（細かいものは，地上解像度によっては写らない）など，色がのっぺりと一様に写る部分では特徴点を検出しにくい．従って，視野全体がそのような部分で覆われた画像については，外部パラメータを正確に推定できない．このような画像が生じないように，他の地物が写りこむような高高度から撮るか，傷・汚れ・色ムラや骨材が写るような低高度から撮る必要がある．
2. 風がある日の植生など，撮影中に揺れたり動いたりする対象物は，撮影の瞬間によって位置や，場合によっては見た目も変わるため，画像間での特徴点の対応付けが成功しにくい．従って，視野全体がそのような部分で覆われた画像については，外部パラメータを正確に推定できない．このような画像が生じないように，十分な高度から撮る必要がある．冠水部の水底についても，水面の波と光の屈折の影響で，撮影の瞬間と位置によって見かけの点が変動するため，同様である．

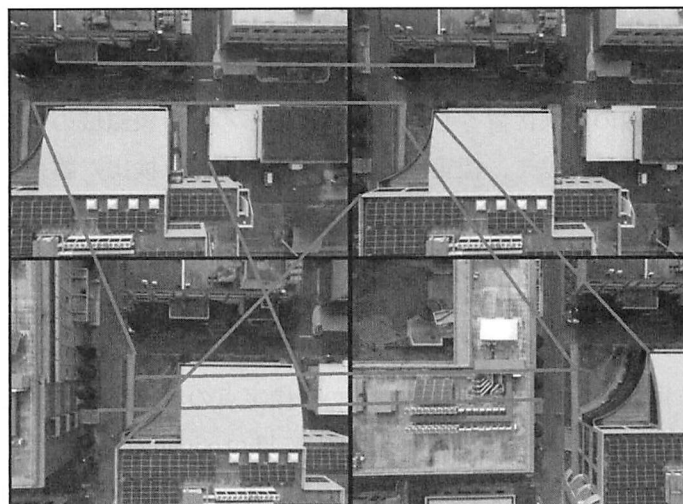


図-6. 4枚の画像間の特徴点のマッチングのイメージ図．実際には非常に多くの対応付けが行われる．

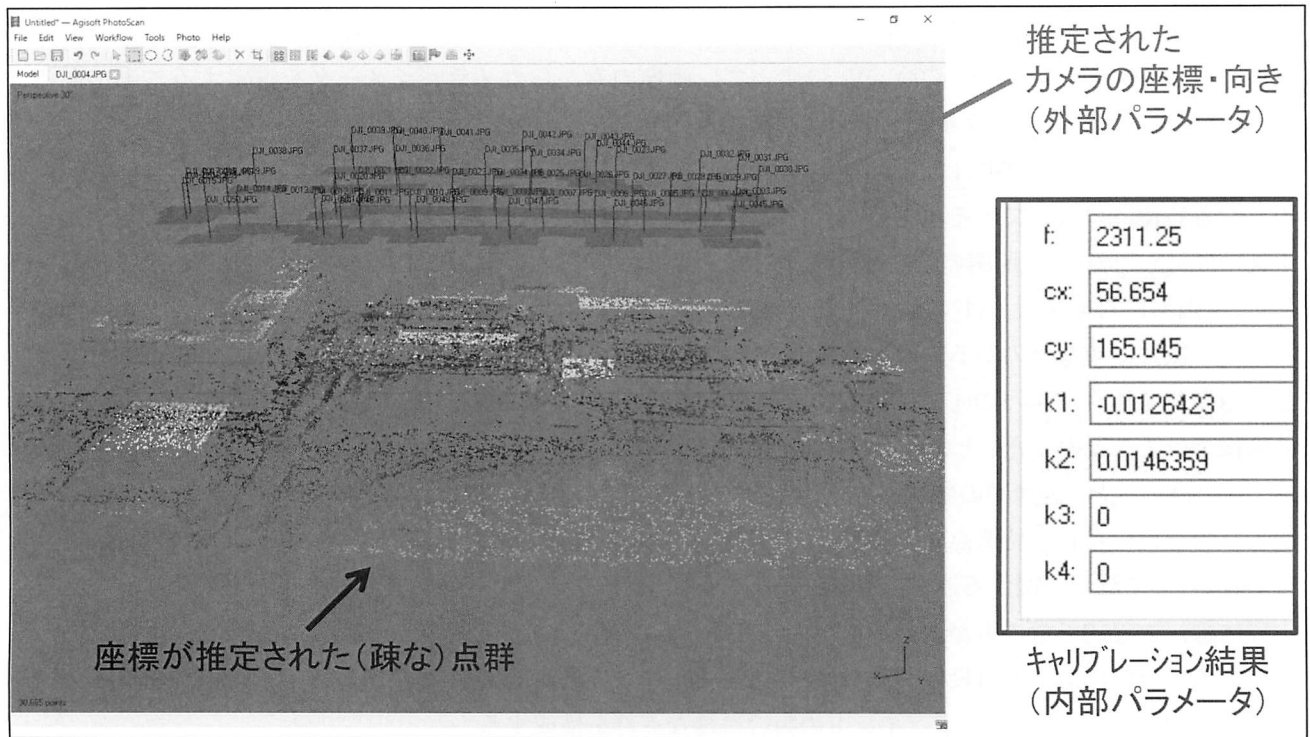


図- 7. SfMの直後のPhotoScanの画面例. 推定されたカメラパラメータと疎な点群が表示されている.

3-2. 標定点を用いたジオリファレンス・バンドル調整

SfMの次のステップが、標定点を用いたジオリファレンス、そしてオプションとしてのバンドル調整 (図- 5 の⑥) である. このステップをSfMに含めることも一般的であるが、本稿では説明の便宜上、独立したステップとみなした. PhotoScanでは「カメラの最適化」というコマンドに相当する. なお、標定点はこのステップの最初の段階で、自動的に画素座標を同定 (PhotoScanでは「マーカールの検出」コマンド) し、精密に実測した世界座標と対応付けておく必要がある (この際、検証点についても同様に準備しておくが良い).

前節のSfMの段階では、入力として画像しか使用していない. 画像では原理的に角度 (正面からの角度) は測れるが、大きさは測れないから、SfMで得られる撮影位置の3次元座標や、対応付けられた特徴点 (タイポイント) の3次元座標は、スケールについて不定である. また座標軸の向きも、いずれかのカメラのカメラ座標系のものを使っているなど、絶対的なものではない. 測量の用途では、このSfMの一時的な座標系を、世界座標系と対応付ける必要がある. これが、ジオリファレンスである.

ジオリファレンスは、3次元の座標変換であり、原点の移動、軸の回転、スケール調整の計7自由度を持つ. 1点の標定点で、XYZ座標に関する方程式が各1つ得られるから、最小で3点あれば、ジオリファレンスに必要な7パラメータを推定できる. 実際には、誤差の低減のためにより多くの標定点を用いるが、それほど多くは必要ないし、無理して対象領域の内部に置く必要もない. むしろ、対象領域の中央部よりは端の方に配置する方が、標定点の世界座標の測量誤差や、標定点の画素座標の推定 (検出) 誤差に対して頑健である (神野ら, 2017, 日本写真測量学会).

しかし標定点には、オプションとしてもう1つの用途がある. バンドル調整というカメラパラメータの最適化に動員し、カメラパラメータの推定精度の向上に役立てるというものである. バンドル調整は、標定点を用いない場合は、前節で述べた連立方程式を出来るだけ満たすようにカメラパラメータを求めるが、標定点を用いる場合には、連立方程式を出来るだけ満たし、かつ標定点の世界座標の推定値が実測値と出来るだけ一致するようなカメラパラメータを求める. より具体的に、PhotoScanの「カメラの最適化」コマンドにおける最小化対象 (目的関数) は、疎な点群 (タイポイントの集合) と標定点に関する再投影誤差のRMSと、標定点の世界座標に関する推定誤差のRMSを、何らかの重みで重みづけしたものである.

PhotoScanの標準的な使い方では、標定点をバンドル調整に動員することになっている。カメラパラメータは、外部パラメータだけでも画像数×6ほどあり、例えば画像数が200枚なら約1200もある。その推定に標定点を用いるとなると、標定点はジオリファレンスのみに用いる場合より、（どのくらいかは事前には判断しにくい）かなり多く必要であることがわかる。また、標定点が直接影響を与えられる外部パラメータは、標定点を写した画像のそれであることから想像できるように、標定点を対象領域内にできるだけ均等に分布させることが、精度上望ましいとされている。

以上のように、標定点をジオリファレンスのみに用いるのか、バンドル調整に動員するのかによって、必要な数や望ましい配置が全く異なる。一般には、対象領域がカメラの視野と比べてあまり小さくなく、斜め撮影を取り入れている、さらにマッチングが比較的成功している場合（目安として、疎な点群の数が多く、マッチングされた画像枚数が平均的に多く、再投影誤差のRMSが小さい場合）、ジオリファレンスに用いるだけで十分となりやすいと考えられる。ただしマッチングの結果によるわけであるから、事前の判断は難しい。

3-3. MVSによる無数の点の三角測量

SfMにおける画像間の特徴点の対応付けでは、各画像の撮影の位置や向きが未知のため、画像1上の特徴点、画像2上のどのあたりの特徴点と対応する可能性があるか、分からなかった。しかし、カメラパラメータが既知となった今、「画像1のこの画素は、画像2ではこの線（エピポーラ線）上に写るはずだ」というような探索範囲の絞り込みが出来るため、より高密度な画像間の対応付けが可能となる。MVSは、この高密度な対応付けを行い、複数の画像上で対応付けられた点の3次元座標を、三角測量の原理で推定する処理である（図-5の⑦）。PhotoScanでは「高密度(Dense)クラウド構築」というコマンドに相当する。自動的なマッチングには誤りも多分に含まれ、誤った点はアウトライア（周囲から外れた点）となるため、MVSにはそれらを除外する工夫も組み込まれている。

MVSにも様々なアルゴリズムがあり、PhotoScanのような商用ソフトではどのようなアルゴリズムが使われているか不明であるが、これだけ理解すれば、次のような注意点が導ける。

1. 前段階でのカメラパラメータの推定が成功しない（疎な点群に関する再投影誤差のRMSや標定点の座標の推定誤差（残差）が大きい）と、MVSにおける画像間の対応付けも上手くいかない。
2. カメラパラメータの推定誤差に起因する系統誤差、例えばドーム状変形などは、SfMで得られる疎な点群から、MVSで得られる密な点群に、そのまま引き継がれる。MVSに入る前に、カメラパラメータの推定精度をチェックしておいた方がよい。

2について、検証点は本来、最終成果物（最終的に成果物として利用・提出するデータ；1つとは限らない）の精度の検証に用いるべきである。例えばDEMが最終成果物ならば、検証点で実測した水平世界座標（例：緯度・経度）の点を含むDEMの画素を特定し、その画素の標高と、その検証点で実測した標高を比較して、その差を誤差と定義する。オルソ画像が最終成果物ならば、オルソ画像上での検証点が写っている点の水平世界座標と、検証点で実測した水平世界座標を比較して、2つの座標が表す点間の距離を誤差と定義する。

しかし、一般にMVSの処理には多大な時間を要し、かつカメラパラメータの精度がMVSの精度に直結する要因であるため、SfMと（行う場合は）標定点を用いたバンドル調整が終わった段階で、検証点を用いて精度を確認し、精度が不十分な場合には解析の設定を見直すことが、（統計学的には多少問題があるが）現実的には有益であろう。この精度確認において、各検証点に関する誤差とは、複数の画像上で同定された検証点の画素座標を用いて三角測量の原理で推定した世界座標と、実測された検証点の世界座標について、2つの座標が表す点間の距離である。図-8に示すように、この段階での検証点の世界座標の推定精度についても、影響する要因、つまり精度が悪い場合に見直すべき条件はかなり多い。

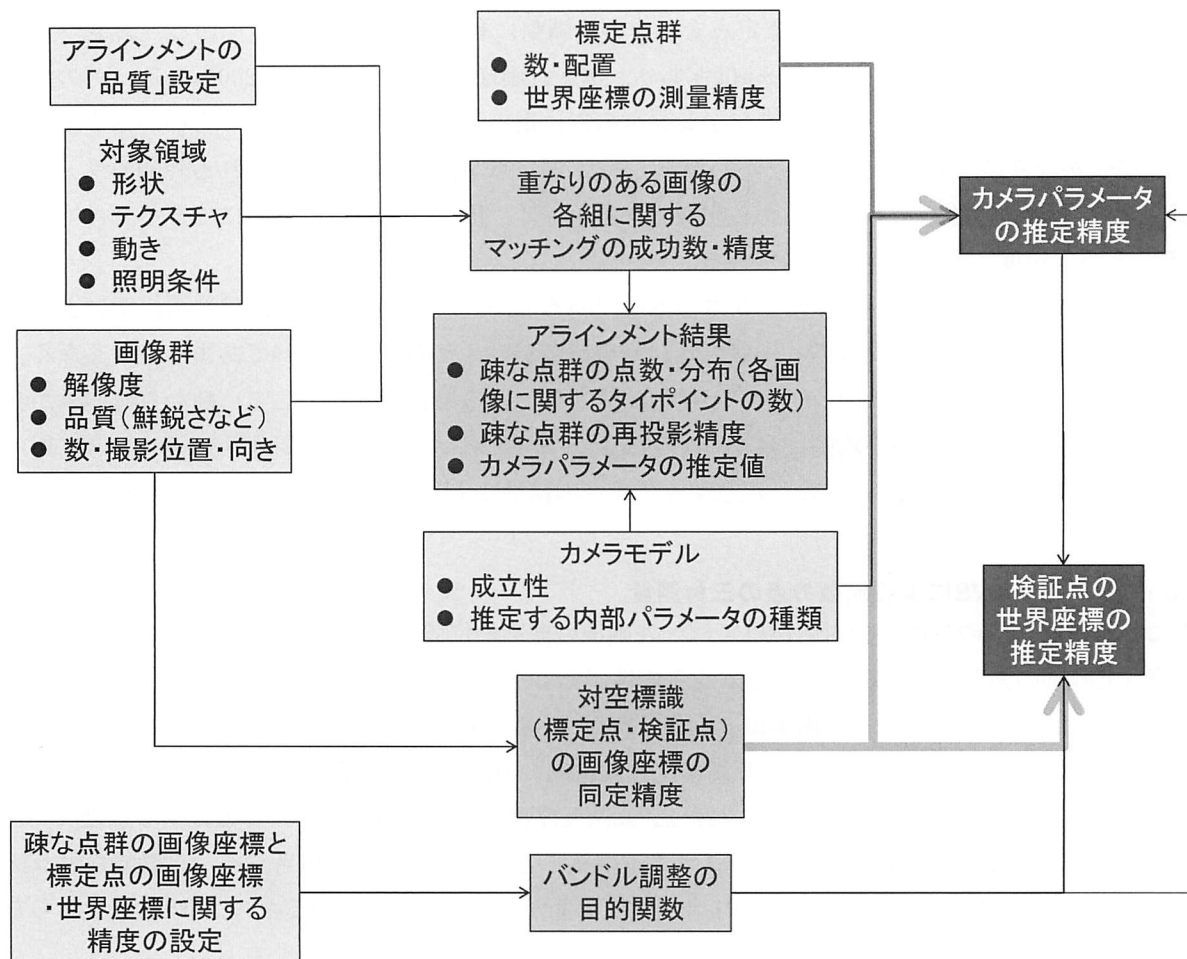


図- 8. 標定点をバンドル調整に動員してPhotoScanで解析を行い、バンドル調整終了時に検証点を用いて精度評価を行う際の、検証点の推定精度への影響要因。解析の設定のように解析段階で見直せる要因と、標定点群の数と配置のように見直しに再調査を要する要因、さらには対象領域の形状やテクスチャのように、変えられない要因もある。

MVSで得られた密な点群の用途は、目的次第で多様である。点群がそのまま最終成果物となることもあれば、その後、DEM（デジタル標高モデル；植生等に関しては表面高を捉えているので、それを意識する場合はDSM：デジタル表面高モデルと呼ばれる）と呼ばれる標高のラスタに変換したり、さらにDEMを用いてオルソ画像を作ったり（図- 5の⑧）、あるいは点群をメッシュ化してテクスチャを貼りつけ、3Dモデルとして利用したりすることもある。

第4章 河道に適用する際の注意点

4-1. はじめに

本章では、簡便なUAV写真測量を河道に適用する際に、注意すべき（だと著者が現時点で考える）事項を列挙する。カメラの選定・設定、対空標識の大きさなど、本章に記載のないことについては、国土地理院の「UAVを用いた公共測量マニュアル（案）」（平成29年3月改正版）の第3編を参照されたい。

ただし本章は、著者の2018年7月現在の知識・理解・経験に基づいて作成したものであり、現在研究中的内容も含んでいる。また、UAV写真測量は精度に影響する要因が多く、その関係も複雑である（図- 8）ため、

基本的な条件（例：冠水部は晴れがいいのか曇りがいいのか）についても、ケースバイケースで、一概には言えないことも多い。本章のご利用に当たっては以上の点にご注意願いたい。

4-2. 標定点・検証点への対空標識の設置

対空標識の設置は、最も骨の折れる現地作業である。精度が確保できるならば、最低限の数を置きやすいところに置いて済ませたいものであるが、その判断は難しい。次のような点に注意が必要である。

1. 対空標識は、黒地に白丸など、自動検出できる対空標識を用いて、解析時に自動検出させた方が、効率・精度ともによい。
2. 標定点とする対空標識は、上方視界の確保のために、杭などで地面から浮かせても構わない。周りの地形と連続している必要はない。
3. 標定点の望ましい配置や必要数は、その用途によって全く異なるが、(2)で十分なのか自体、SfMの結果に依存するため、事前の判断は難しい。そのため、通常は(1)の用途で用いることを想定して標定点を配置するべきであると考えられる。

(1) 標定点をバンドル調整に動員する場合（点群の分布の補正にも用いる場合）：

- 1 河道内にできるだけ均等に置いた方が良いが（図- 9）、河道内の植生や冠水部の存在により、一般にそれは難しい（図- 10）。堤防上（法尻～天端）に置くのが現実的である。標定点を兩岸堤防上に計4点置くだけでも、配置によっては高精度が得られるが、安定した精度を得るにはより多くの標定点を置くことが望ましい（志賀ら，2018；図- 11）。兩岸に計6点置く場合のイメージを図- 12に示す。効率的な配置については現在検討中。
- 2 標定点は、天端と法尻を組み合わせるなどして、できるだけ同一平面上に乗らないように設置する。原理的に、標定点が完全に同一平面上にあると、内部パラメータの一部が不定となるためである。
- 3 対象領域が平坦で、標定点間の高低差を確保しにくい場合には、三脚・ポールなどの上に対空標識を設置して整準・求心すれば、地面に直接置いた対空標識との間に1.5 m程度の高低差を確保することは可能であろう。



図- 9. 国土地理院のマニュアル案に基づく標定点の配置。対象領域が約200 m四方で、精度0.10 m以内を目指す場合、外周と内部の計9点必要。

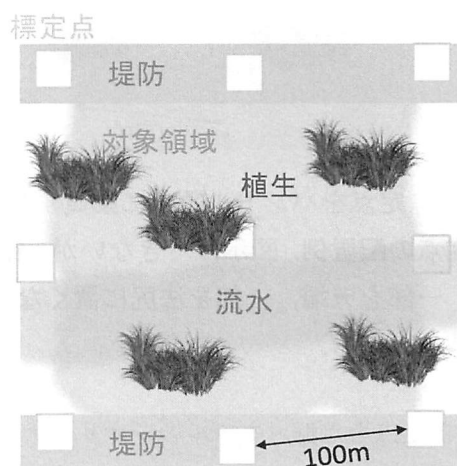


図- 10. 対象領域が河道の場合、標定点を内部に置くことは、植生や流水により、難しいことが多い。堤防上（法尻～天端）に置くのが現実的。

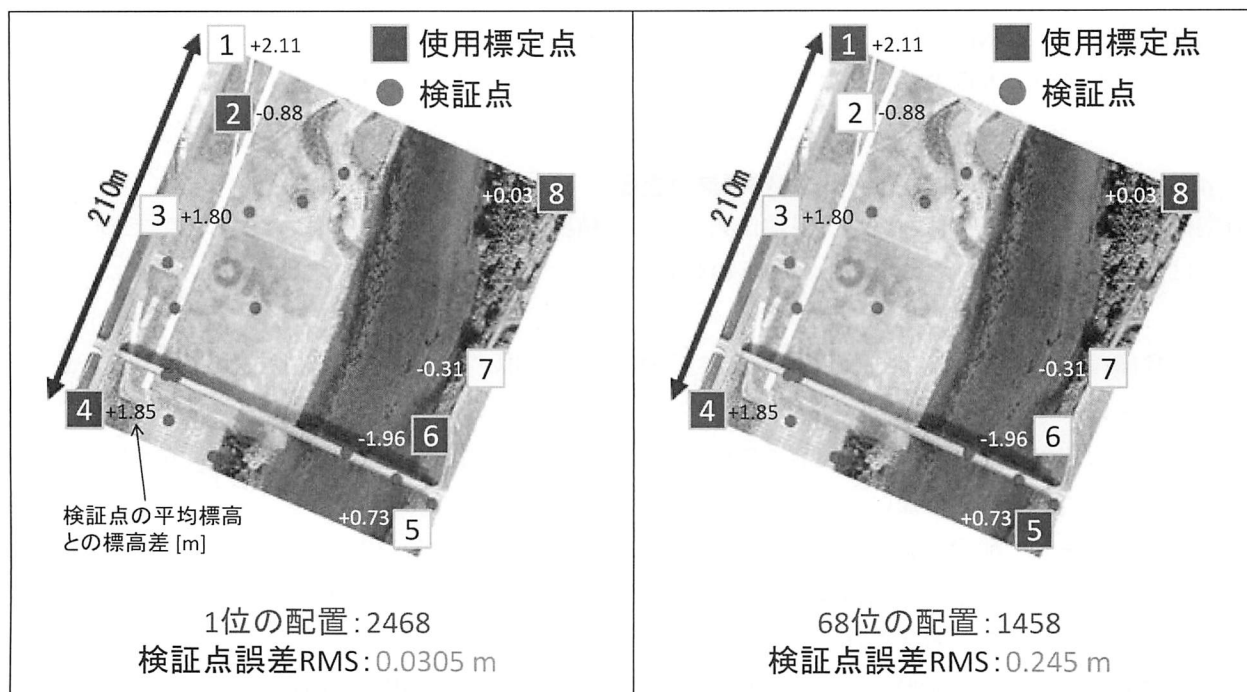


図- 11. 佐波川での現地実験（志賀ら, 2018）における，標定点の配置と精度の例．計8点の候補から4点を選ぶ計70通りの標定点配置の中の2例である．この研究から，標定点を堤防上に置くだけでも高精度が得られることもあるが，両岸計4点では精度が不安定であるとともに特徴づけが難しく，少なくとも両岸計5点置くべきであると結論されている．

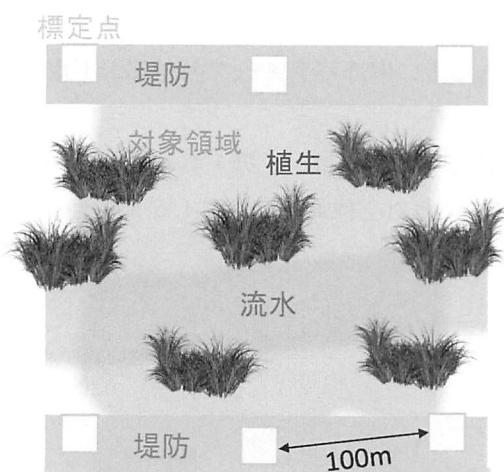


図- 12. 標定点をバンドル調整に動員する場合の標定点の配置例．図示はできないが，各岸の3点は，一部を天端，一部を法尻に置くなどして高低差をつける．



図- 13. 標定点をジオリファレンスのみに用いる場合の標定点の配置例．4隅に数 m だけ離して複数点を置いている．左図の置き方に比べて，対空標識の監視などが楽になる場合がある．

(2) 標定点を点群・モデルのジオリファレンスのみに用いる場合（世界座標を与えるためだけに用いる場合）：

- 1 対象領域の中央部よりは端の方に配置する方が，どちらかと言えば，標定点の世界座標の測量誤差や，標定点の画素座標の推定（検出）誤差に対して頑健である（神野ら, 2017, 日本写真測量学会）．個々の配置案について，これらの誤差に対するジオリファレンスの頑健性を，事前にシミュレートすることも出来る．単純化した目安としては，標定点を結んで出来る多角形

の面積が大きくなるように配置する。

- 2 対象領域がほぼ四角形の場合には、4隅に配置するのもよい。4隅に1点ずつでは、ジオリファレンスの精度に不安があるので、4隅に数 m 程度の間隔で複数点置く（図- 13）方がよい。
- 3 ただし、ドーム状変形などの系統誤差が顕著な場合には、4隅に合わせたジオリファレンスが全体に合わないので、この方法はベストではない。この場合は図- 12のような置き方が相対的には良いが、そもそも系統誤差を解消しなければ、河道内部について妥当な結果は得られない。
- 4 標定点に高低差をつける必要はない。

4-3. 撮影

撮影の日時の選択や方法は、精度に決定的な影響を与える。次のような点に注意が必要である。

1. 撮影日時は、天候・水位・濁りを考慮して選ぶ。

- (ア) 風は出来るだけ弱い方がよい。UAVが問題なく飛べる風速でも、植生が風に揺れること、水面が風で波立つことが、画像間の特徴点のマッチングを阻害し、カメラパラメータの推定精度を低下させるため、その他のエリアの測量精度にも悪影響を及ぼす。
- (イ) 干出部のみを対象として、干出部が主に表面に光沢のないもの（自然の土砂、礫、多くの植生など）で覆われている場合には、日射量が多い時、つまり日照のある晴天で、太陽高度の高い時間帯が有利である。日射量が多いほど、地表面からカメラへの反射光も多いため、露光時間を短く設定してブレを防ぎ、ISO感度を小さく設定してノイズを抑制できるためである。
- (ウ) 冠水部も対象とする場合には、干出部については「日照のある晴天で、太陽高度の高い時間帯」が有利であるが、冠水部については、太陽直達光の水面反射により、（太陽位置・画角・水面状態にもよるが）画像の一部がキラキラする（ハレーション；sun glint）。その部分では水底が十分に見えず、画像間の特徴点のマッチングが成功しなくなるため、それを補うために高いオーバーラップ率での撮影や、場合によっては効率を犠牲にして水面反射軽減技術（Partamaら、印刷中）を用いた撮影が必要となると考えられる。
- (エ) 水位が低く、河道の中に干出部が多い時の方が、精度上、有利である。干出部の方が冠水部より精度が期待できるためである。
- (オ) 冠水部も対象とする場合には、濁りが少ない方が、測定できる最大水深と精度が良くなる。

2. 下向きの平行撮影のみならず、斜め撮影を含める。

- (ア) 撮影の向きに多様性を持たせることで、歪みパラメータなどの推定精度が向上し、ドーム状変形を抑制できるとされている（例えば、James and Robson, 2014）。
- (イ) 原理的に、完全な平行撮影では、SfMにおいて、画像のみからは画面距離が求まらない（PhotoScanでは「写真のアラインメント」で、 f が求まらない）。
- (ウ) 一方、撮影の向きが大きく異なる画像間では、マッチングが難しくなる。特に立体的な地物は向きによって見え方が大きく変わる。マッチングに障害が出ない程度の傾け方がよい。現在検討中であるが、20度以上は傾け過ぎであると思われる。

3. 画像の大半が水面であるような画像が生じないような高度から撮る。

- (ア) 水面下の河床上の点のマッチングは、数・精度ともに、陸上の動かない点に劣る。理由は、水面での光の反射・屈折、波による見かけの点の変動、水深による河床のテクスチャの不鮮明化など。従って、水面が占める割合が多い画像の外部パラメータは、推定精度が悪いと考えられる。
- (イ) もし、所要の解像度と画角から考えて、画像の大半が水面であるような画像の発生が避けられない場合には、兩岸を視野に収めたような高高度の画像を追加するのが有効であると考えられる。

4-4. 解析

標定点の設置や撮影が適切でも、解析の方法を誤ると本来の精度が出ない。次の点に注意が必要である。

1. UAVによっては、画像のEXIFに格納される座標の、特に高度に大きな誤差がある。そのような場合、EXIFに含まれる撮影位置の情報は、用いない方がよい。PhotoScanでは、「写真のアラインメント」の前に、「座標データ」ペインで、全画像のチェックを外しておく。
2. 標定点の数が十分でないなら、標定点はバンドル調整に用いるべきではなく、ジオリファレンスのみに用いるべきである。特に、標定点が分布するエリアの外に関心領域がある場合には、なおさらである。
3. バンドル調整での最小化対象（目的関数）における、疎な点群（タイポイントの集合）の再投影誤差と、標定点の世界座標に関する推定誤差に関する重みの設定（PhotoScanでは「座標設定」ダイアログ）は、あまり認知されていないが、結果に決定的な影響を与える。標定点の世界座標に関する推定誤差（残差）が大きい場合には、その重みが不足している可能性がある。
4. 冠水部については、水面における屈折の影響で、河床が高く（水深が浅く）推定される。密な点群もしくはDEMを作った後に、見かけの水深に補正係数を乗じるなどの方法で補正を行う必要がある。点群の各点について、最適な補正係数は、その点の座標推定に用いられた画像の撮影位置や重みに依存するが、これらは現在の一般的なソフトウェアでは知ることができないため、各点における補正係数を幾何学的に求めることはできない。従って、冠水部の数点をRTK-GNSS等で測量して補正係数を合わせ込むことが望ましい（神野ら、2017、河川技術論文集）が、神野ら（2018、河川技術論文集）はそれが出来ない場合に用いるべき補正係数として、シミュレーションに基づく値1.42を提案している。

引用文献

- 神野有生, I GD Yudha Partama, 志賀有里子, 宮崎真弘, 小室隆, 赤松良久, 関根雅彦, UAV写真測量における標定点(GCP)の節減策に関する検討, 日本写真測量学会平成29年度秋季学術講演会発表論文集, 2017.
- 神野有生, 赤松良久, I GD Yudha Partama, 乾隆帝, 後藤益滋, 掛波優作, UAVとSfM-MVSを用いた河道水面下測量技術における水面屈折補正の高度化, 河川技術論文集, 第23巻, pp. 185-190, 2017.
- 神野有生, 米原千絵, I GD Yudha Partama, 小室隆, 乾隆帝, 後藤益滋, 赤松良久, UAVとSfM-MVSを用いた河床冠水部の写真測量のための水面屈折補正係数に関する検討, 河川技術論文集, 第24巻, pp. 19-24, 2018.
- 国土地理院, UAVを用いた公共測量マニュアル(案), 平成29年3月改正版, 2017.
- 志賀有里子, 神野有生, 宮崎真弘, I GD Yudha Partama, 小室隆, 赤松良久, 関根雅彦, 小型UAV画像のSfMにおける標定点の数・配置と精度に関する検討, 日本写真測量学会平成30年度年次学術講演会発表論文集, 2018.
- 野間口芳希, 秋田麗子, 炭田英俊, 山崎崇徳, 河川管理における新技術の活用に関する一考察, 河川技術論文集, 第24巻, pp. 251-256, 2018.
- I. G. Y. Partama, A. Kanno, M. Ueda, Y. Akamatsu, R. Inui, M. Sekine, K. Yamamoto, T. Imai, and T. Higuchi, Removal of Water-Surface Reflection Effects with a Temporal Minimum Filter for UAV-Based Shallow-Water Photogrammetry, Earth Surface Processes and Landforms, printing.
- James, M. R., & Robson, S. (2014). Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. Earth Surface Processes and Landforms. doi:10.1002/esp.3609